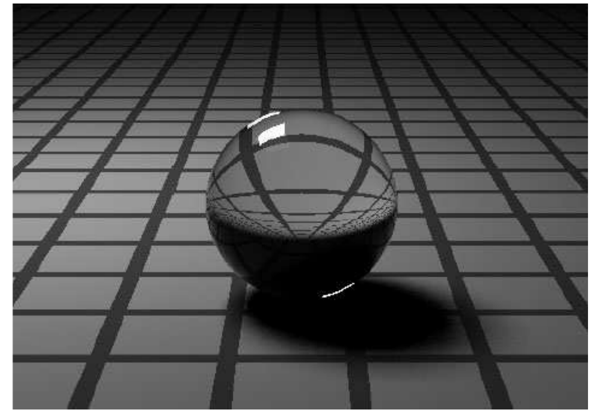
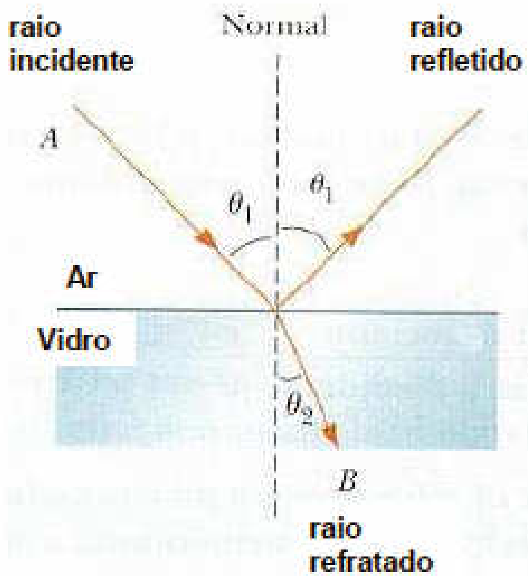
Física Experimental IV - 2008
Polarização por Reflexão
ângulo de Brewster

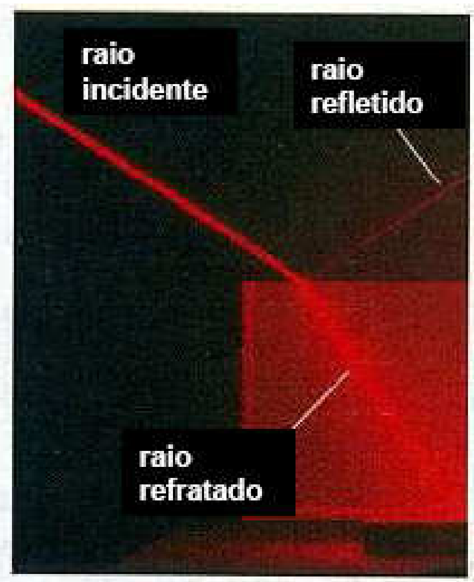
Prof. Alexandre Suaide
Prof. Manfredo Tabacniks

Reflexão e Refração da Luz



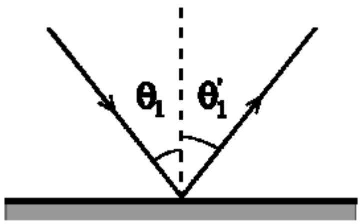
Na interface entre dois meios.





fisica.ufpr.br/edilson/cap34.pdf

Lei da reflexão

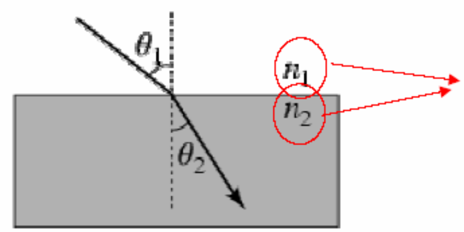


$$\boxed{\theta_1' = \theta_1}$$

Raio refletido no plano de incidência

Refração

Lei da refração

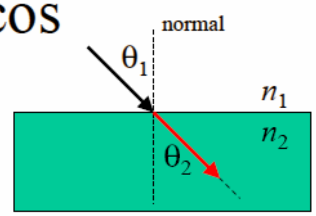


$$\boxed{n_2 \,\text{sen}\, \theta_2 = n_1 \,\text{sen}\, \theta_1}$$ (lei de Snell)

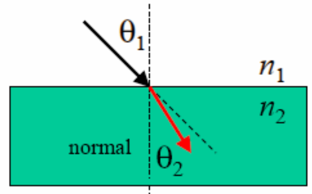
fisica.ufpr.br/edilson/cap34.pdf

Resultados básicos

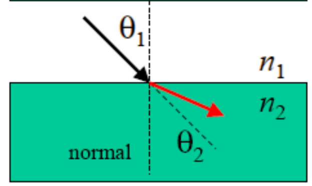
- $n_2 = n_1 \Rightarrow \theta_2 = \theta_1$



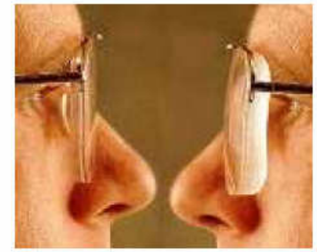
- $n_2 > n_1 \Rightarrow \theta_2 < \theta_1$



- $n_2 < n_1 \Rightarrow \theta_2 > \theta_1$



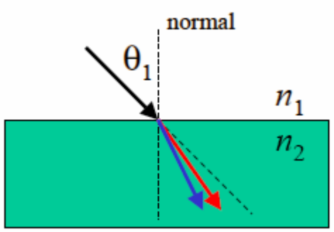
Índice de refração



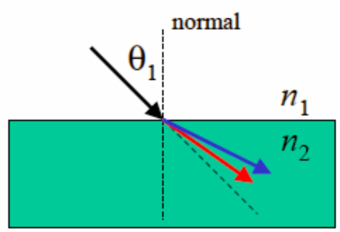
Material	Índice de Refração*
ar	1,0003
diamante	2,419
sílica fundida	1,458
quartzo	1,418
flint leve	1,655

*para 589,29 nm

Lei de Snell e dispersão



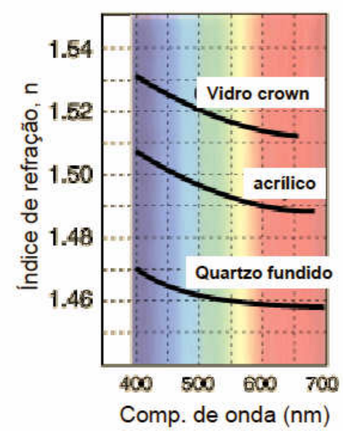
$n_2 > n_1$

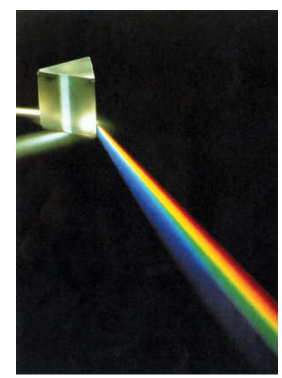


$n_2 < n_1$

Dispersão cromática

$\Rightarrow n(\lambda)$

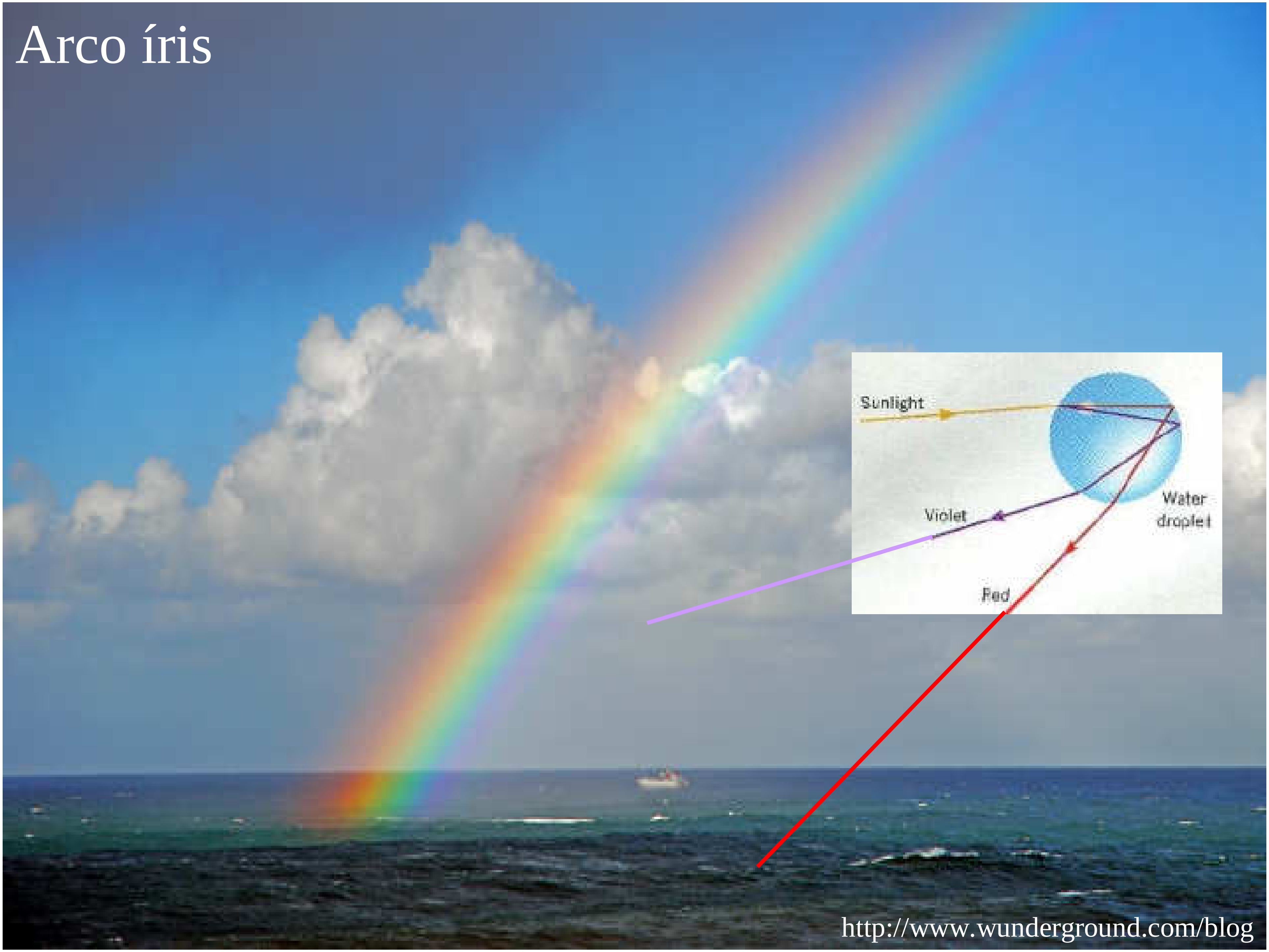




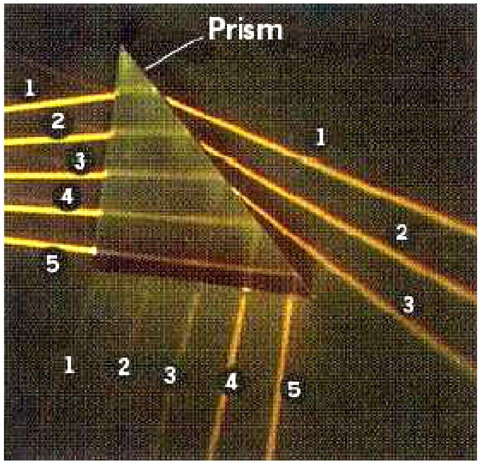
prisma

fisica.ufpr.br/edilson/cap34.pdf

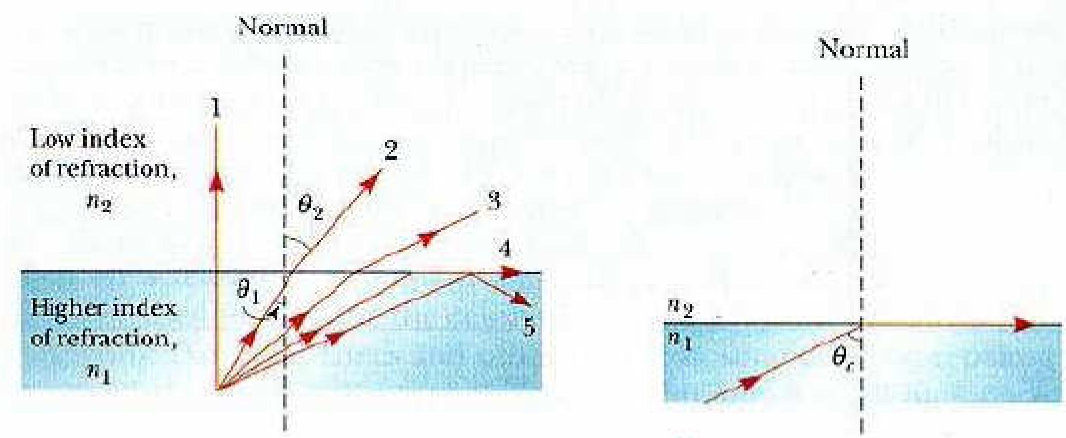
Arco íris


Sunlight
Violet
Water droplet
Red
http://www.wunderground.com/blog

Reflexão interna total



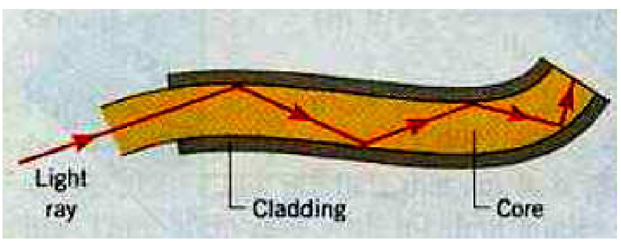
quando $n_1 > n_2$



$$n_1 \operatorname{sen}\theta_c = n_2 \underbrace{\operatorname{sen} 90^\circ}_{1}$$

$$\boxed{\theta_c = \operatorname{arcsen}\frac{n_2}{n_1}}$$

Fibra óptica



fisica.ufpr.br/edilson/cap34.pdf

Polarização por reflexão

Luz refletida

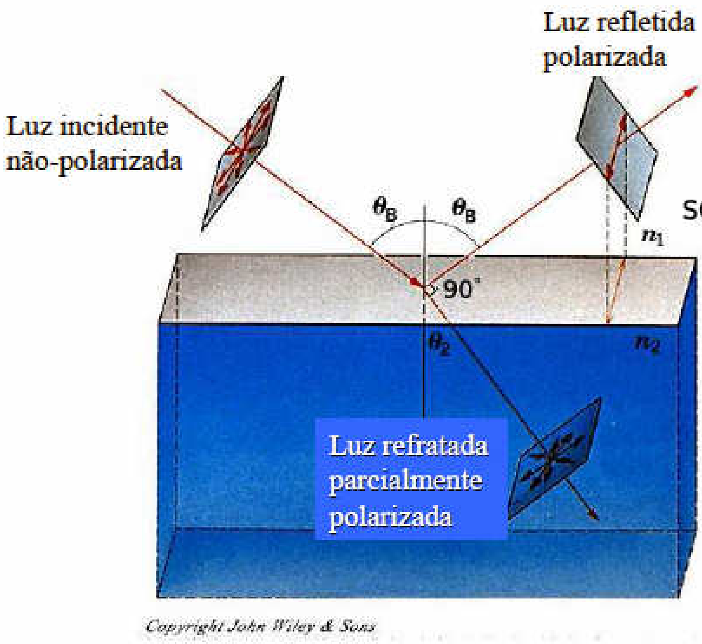
Parcialmente polarizada

com polarizador

https://www.camerasdirect.com.au/images/stories/FAQ/CircularPolarizer.jpg

Lei de Brewster

Num ângulo particular:

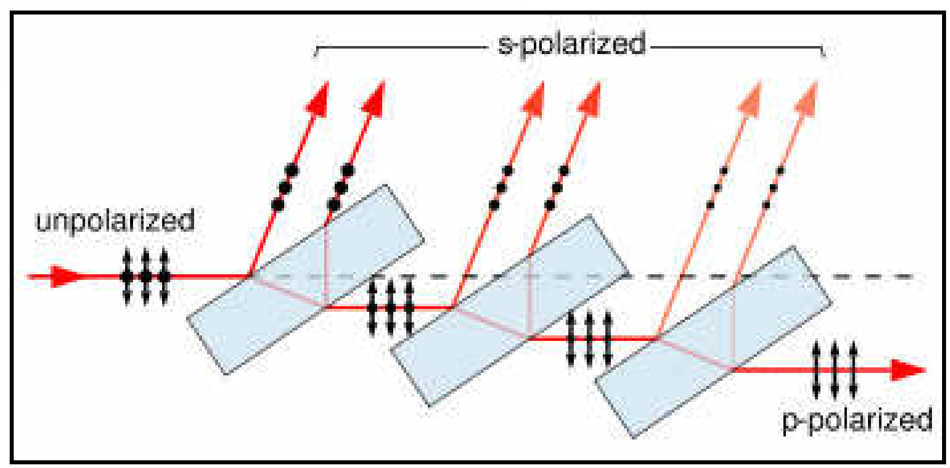


$$\theta_B + \theta_2 = 90^\circ$$

$$n_1 \,\mathrm{sen}\, \theta_B = n_2 \,\mathrm{sen}\, \theta_2$$

$$\mathrm{sen}\, \theta_2 = \mathrm{sen}(90^\circ - \theta_B) = \cos \theta_B$$

$$\Rightarrow \boxed{\theta_B = \mathrm{arctg}\, \frac{n_2}{n_1}}$$

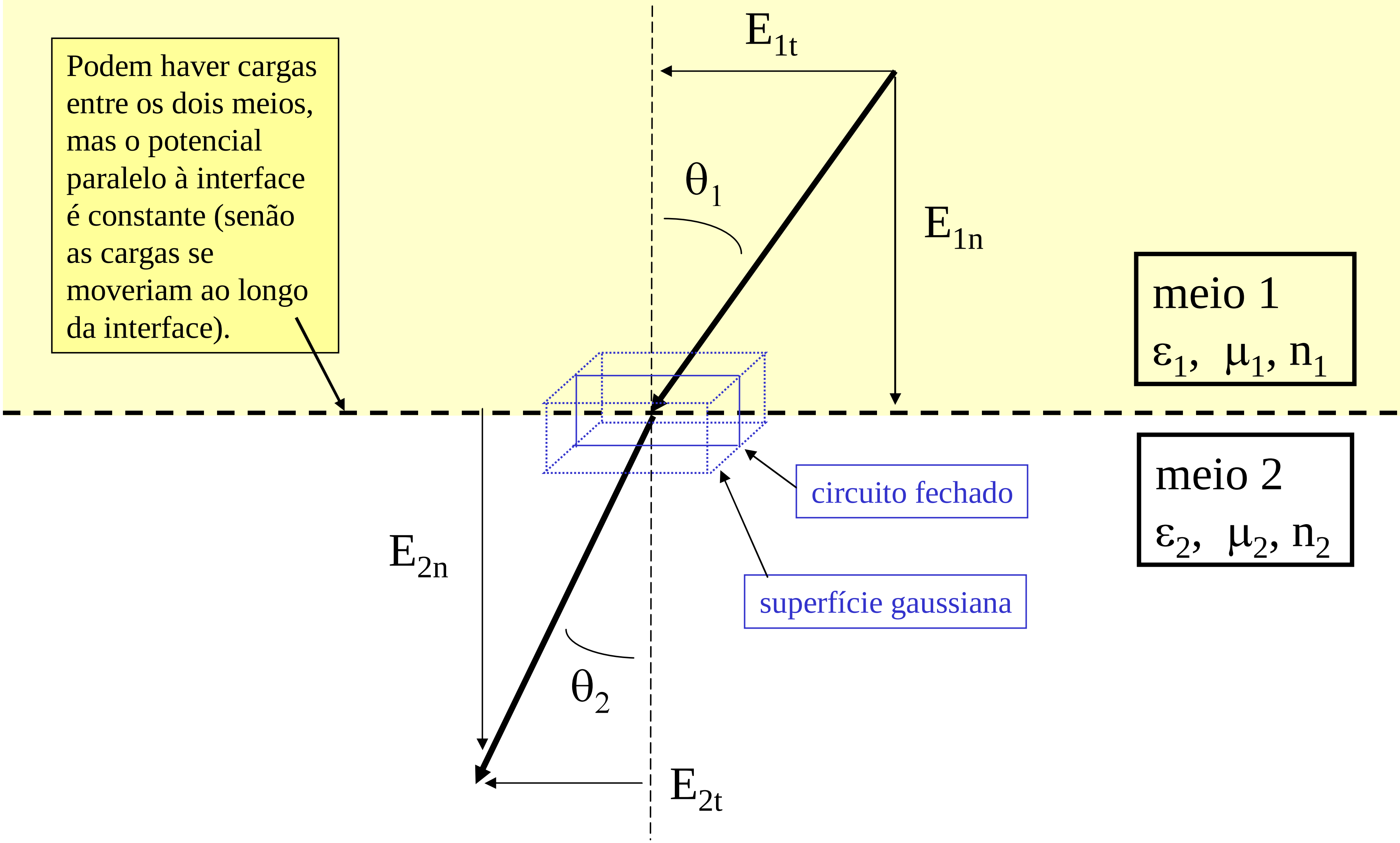


fisica.ufpr.br/edilson/cap34.pdf

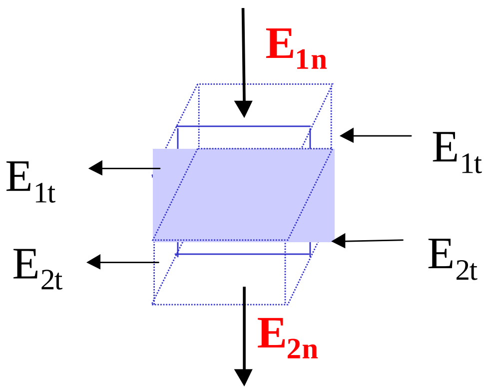
CONTINUIDADE DE CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS NA MUDANÇA DE MEIOS

CONTINUIDADE DO CAMPO ELÉTRICO

Podem haver cargas entre os dois meios, mas o potencial paralelo à interface é constante (senão as cargas se moveriam ao longo da interface).



CONTINUIDADE DO **CAMPO ELÉTRICO NORMAL**



A superfície "gaussiana" é suficientemente pequena para que E(x,y,z) não varie de um lado a outro, exceto na mudança de meios, em que pode ocorrer uma descontinuidade devido às cargas na interface.

lei de Gauss

carga livre

$$\boxed{\oint_s \varepsilon \vec{E}.d\vec{s} = q}$$

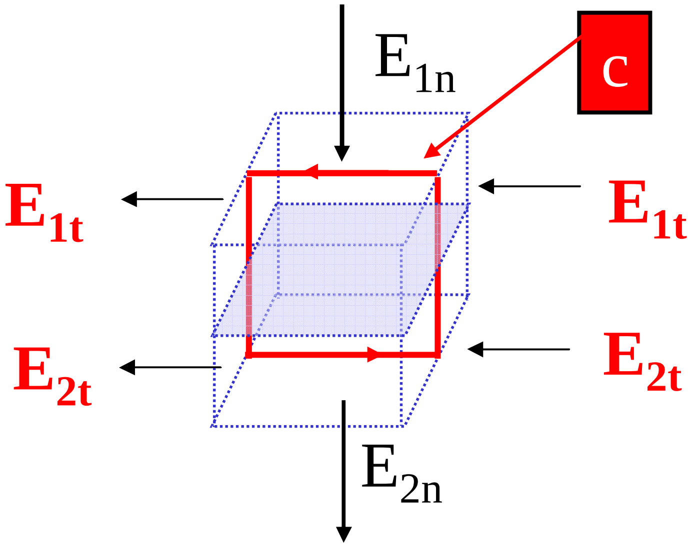
As únicas componentes não nulas vêm das tampas, uma vez que E_{1t} e E_{2t} se cancelam.

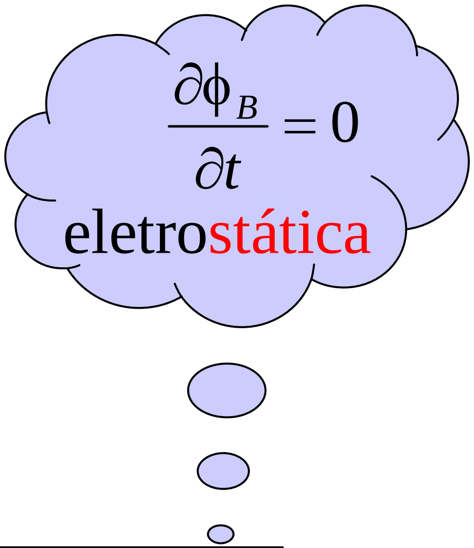
$-\varepsilon_1 E_{1n} + \varepsilon_2 E_{2n} = \sigma$	interface com densidade de cargas superficial
$-\varepsilon_1 E_{1n} + \varepsilon_2 E_{2n} = 0$	dielétrico, σ = 0

DIELÉTRICO

$$\boxed{\varepsilon_1 E_{1n} = \varepsilon_2 E_{2n}}$$

CONTINUIDADE DO **CAMPO ELÉTRICO TANGENCIAL**



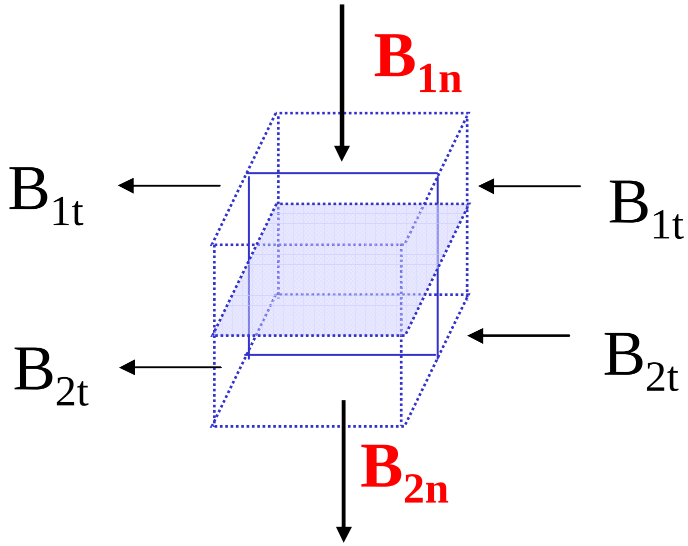


$$\oint_c \vec{E}.d\vec{l} = -\frac{\partial \phi_B}{\partial t}$$

$$LE_{1t} - LE_{2t} = 0$$

$$\boxed{E_{1t} = E_{2t}}$$

CONTINUIDADE DO **CAMPO MAGNÉTICO** **NORMAL**



A superfície "gaussiana" é suficientemente pequena para que B(x,y,z) não varie de um lado a outro.

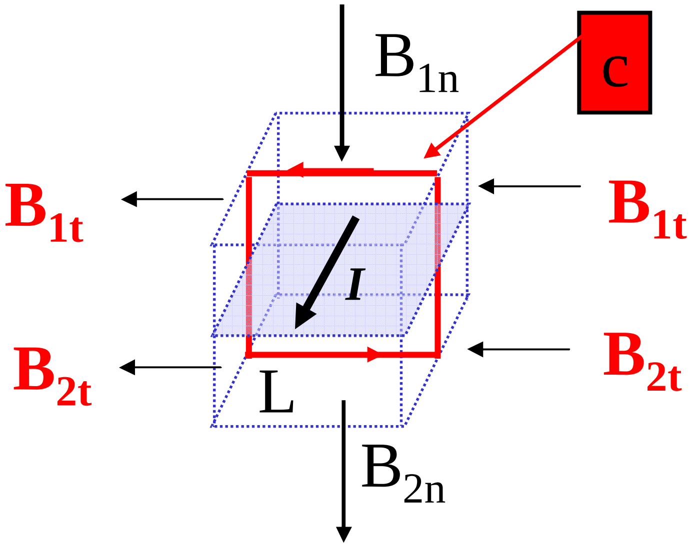
lei de Gauss do magnetismo

$$\oint_s \vec{B}.d\vec{s} = 0$$

$$-B_{1n} + B_{2n} = 0$$

$$\boxed{B_{1n} = B_{2n}}$$

CONTINUIDADE DO CAMPO MAGNÉTICO TANGENCIAL



corrente concatenada $I = j.L$

lei de Ampère

$$\frac{\partial \phi_E}{\partial t} = 0$$

eletrostática

$$\oint_c \frac{\vec{B}}{\mu}.d\vec{l} = I + \varepsilon \frac{\partial \phi_E}{\partial t}$$

$$\left(\frac{B_{1t}}{\mu_1} - \frac{B_{2t}}{\mu_2} \right) L = j.L$$

$$\frac{B_{1t}}{\mu_1} - \frac{B_{2t}}{\mu_2} = j$$

$$\boxed{\frac{B_{1t}}{\mu_1} = \frac{B_{2t}}{\mu_2} \qquad \text{em dielétricos, } j = 0}$$

RESUMO

CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS EM DIELÉTRICOS

$$\varepsilon_1 E_{1n} = \varepsilon_2 E_{2n}$$

$$E_{1t} = E_{2t}$$

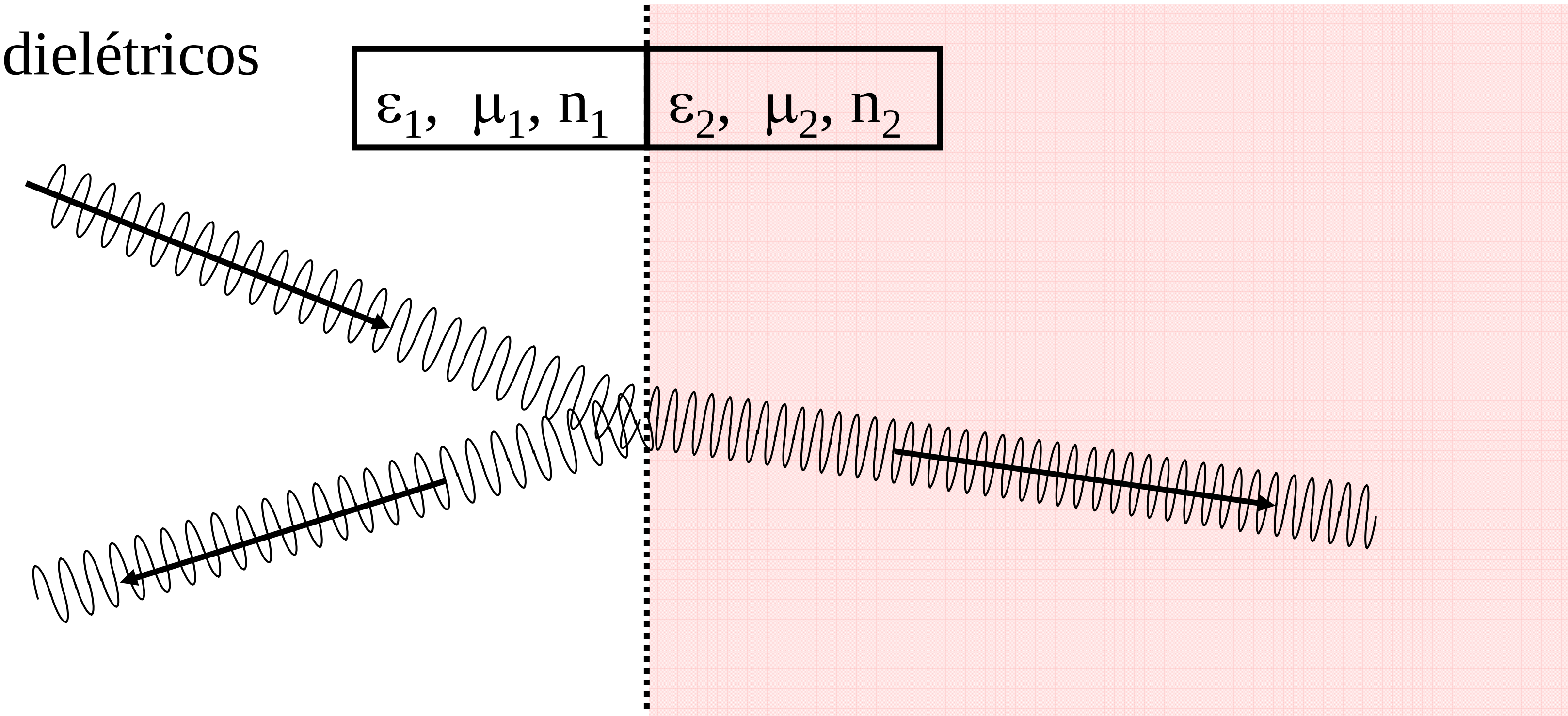
$$B_{1n} = B_{2n}$$

$$\frac{B_{1t}}{\mu_1} = \frac{B_{2t}}{\mu_2}$$

Vale para campos estáticos ou lentamente variáveis. Em especial para ondas EM. Define as propiedades da óptica. A REFLEXÃO e a REFRAÇÃO

TRANSMISSÃO E REFLEXÃO DE ONDAS NA MUDANÇA DE MEIOS

Ondas em dielétricos



Ao passar de um meio para outro a onda EM **tem** que satisfazer as 6 condições

$$\lambda = \mathrm{v}T = \frac{c}{n_i}\frac{2\pi}{\omega}$$

$$\varepsilon_1 E_{1n} = \varepsilon_2 E_{2n}$$

$$B_{1n} = B_{2n}$$

$$\frac{\left|\vec{E}\right|}{\left|\vec{B}\right|} = \mathrm{v} = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}$$

$$E_{1t} = E_{2t}$$

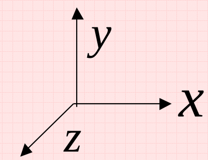
$$\frac{B_{1t}}{\mu_1} = \frac{B_{2t}}{\mu_2}$$

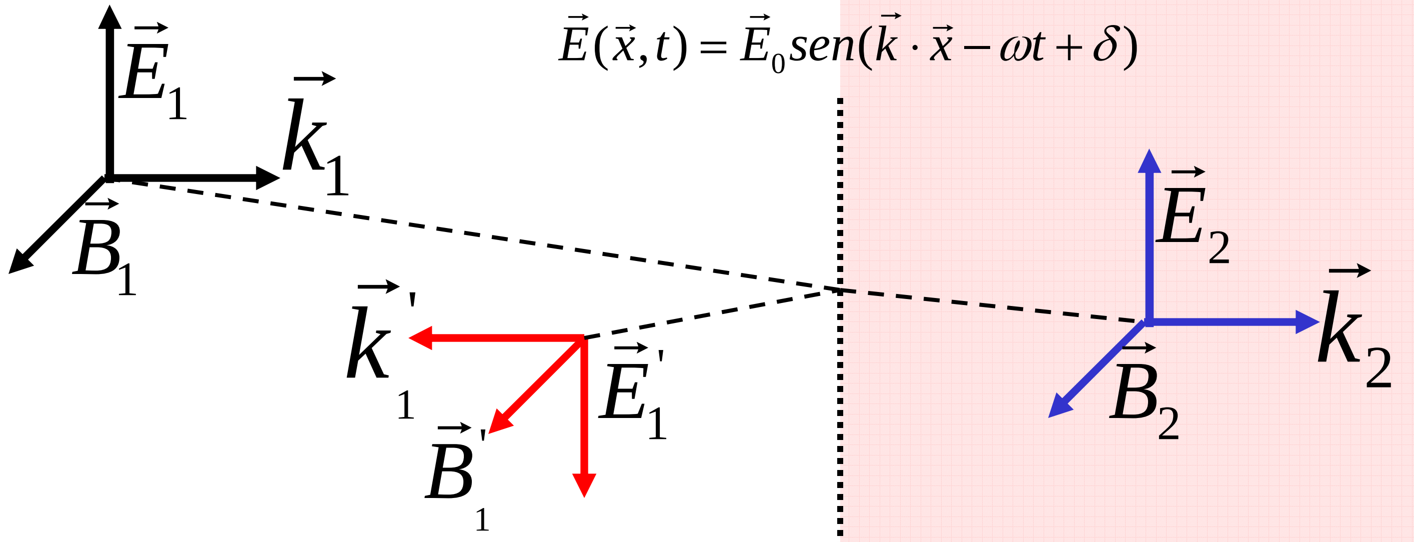
Ondas em dielétricos

Incidência normal

$\varepsilon_1, \ \mu_0, n_1$	$\varepsilon_2, \ \mu_0, n_2$

$$\vec{E}(\vec{x},t) = \vec{E}_0 sen(\vec{k}\cdot\vec{x} - \omega t + \delta)$$





Ao passar de um meio para outro a onda EM **tem** que satisfazer as condições de contorno. A solução exige que haja uma onda refletida (com inversão de ***E***) e outra transmitida. Uma vez que a incidência é normal, só existem E_t e B_t.

(I) $$\sum E_{1t} = \sum E_{2t}$$

$$E_{01} sen\, \omega t - E'_{01} sen\, \omega t = E_{02} sen\, \omega t$$

$$\boxed{E_{01} - E'_{01} = E_{02}}$$

(II) $$\sum \frac{B_{1t}}{\mu_1} = \sum \frac{B_{2t}}{\mu_2} \quad \rightarrow \quad \frac{B_1}{\mu_0} + \frac{B'_1}{\mu_0} = \frac{B_2}{\mu_0}$$

mas $B = \dfrac{E}{v} = \dfrac{E}{c/n} = \dfrac{E}{c/\sqrt{\kappa}} = \dfrac{E}{c}\sqrt{\dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_0}}$

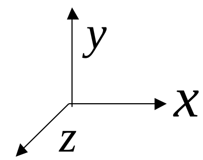
$$\sqrt{\varepsilon_1} E_{01} + \sqrt{\varepsilon_1} E'_{01} = \sqrt{\varepsilon_2} E_{02}$$

$$\boxed{E_{01} + E'_{01} = \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} E_{02}}$$

Ondas em dielétricos

Incidência normal

$$\vec{E}(\vec{x},t) = \vec{E}_0 sen(\vec{k}\cdot\vec{x} - \omega t + \delta)$$



$$\boxed{E_{01} - E_{01}^{'} = E_{02} \quad \text{(I)}}$$

$$\frac{B_{1,t}}{\mu_1} + \frac{B'_{1,t}}{\mu_1} = \frac{B_{2,t}}{\mu_2}$$

com $\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$

$$E_{01} + E_{01}^{'} = \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} E_{02} \quad \text{(II)}$$

$$\frac{E_{02}}{E_{01}} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}}$$

$$n = \sqrt{\kappa} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}}$$

TRANSMISSÃO

$$\boxed{t = \frac{E_{02}}{E_{01}} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2}}$$

REFLEXÃO

analogamente

$$\boxed{r = \frac{E_{01}^{'}}{E_{01}} = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}}$$

note que se $n_1 = n_2$,
isto é, se não houver mudança
de meio, $t = 1$ e $r = 0$.

Uma vez que Es e Bs estão acoplados pelas leis de Maxwell, uma vez encontrada uma relação para o campo elétrico implica automaticamente satisfazer as condições para o campo magnético.

Ondas em dielétricos
Incidência normal

mas a intensidade da onda depende de E^2

$$I = \mathrm{v}.\varepsilon.E^2$$

$$I_{inc} = \mathrm{v}_1.\varepsilon_1.E_{01}^{\ 2}$$

$$I_{ref} = \mathrm{v}_1.\varepsilon_1.E_{01}^{'\ 2}$$

$$I_{trans} = \mathrm{v}_2.\varepsilon_2.E_{02}^{\ 2}$$

TRANSMISSÃO

$$\boxed{t = \frac{E_{02}}{E_{01}} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2}}$$

REFLEXÃO

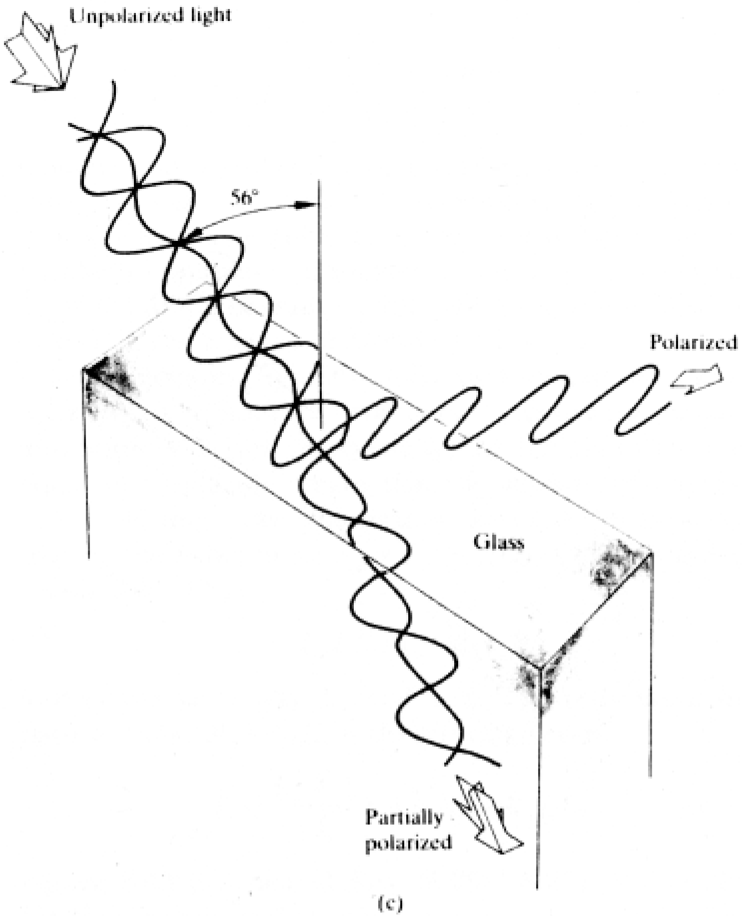
$$\boxed{r = \frac{E_{01}^{'}}{E_{01}} = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}}$$

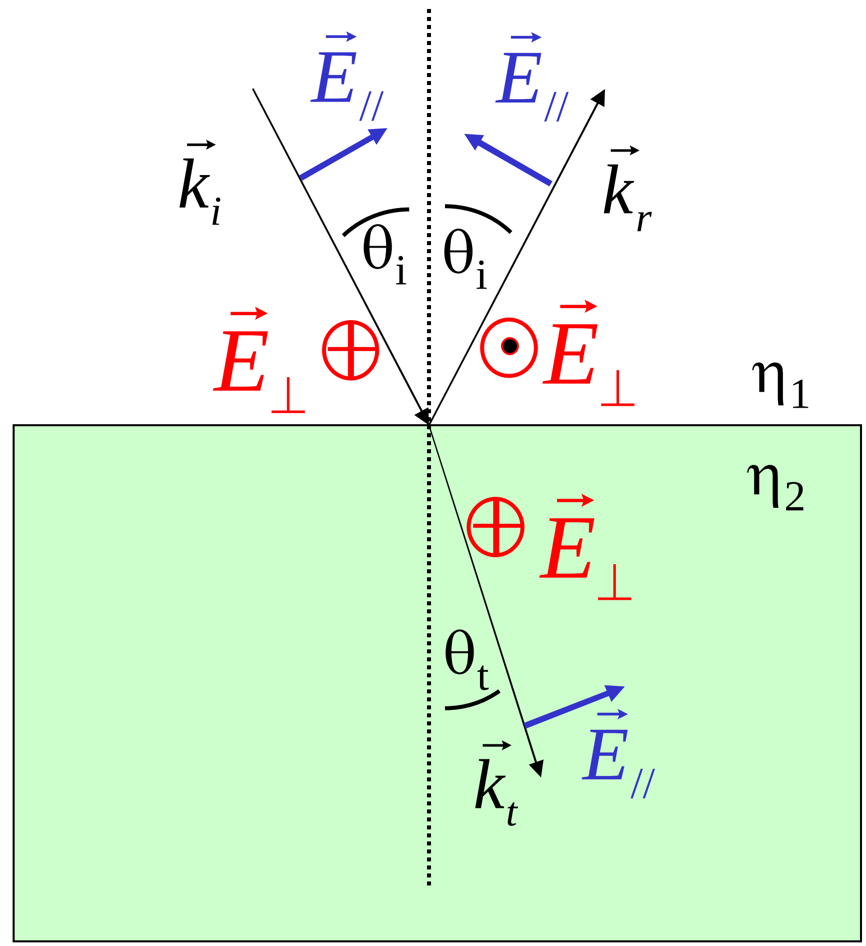
coeficientes de transmissão e reflexão de potência

$$\boxed{\begin{aligned} T &= \frac{I_{trans}}{I_{inc}} = \frac{4n_1n_2}{(n_1 + n_2)^2} \\ R &= \frac{I_{ref}}{I_{inc}} = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} \end{aligned}}$$

Ondas em dielétricos
Incidência oblíqua

- os 3 raios são coplanares
- têm mesma freqüência, ω
- têm mesma fase na interface





Reitz, Milford, Christy. Fundamentos da Teoria Eletromagnética, Ed Campus, 1982:372

Incidência oblíqua em dielétricos

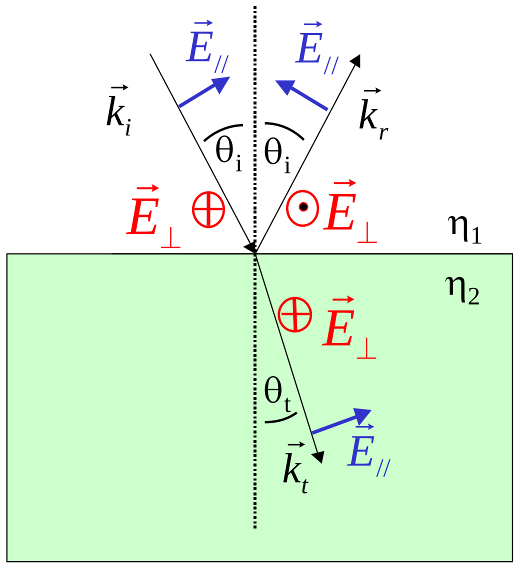
$$\overline{E}_i = E_0\left(\hat{x}\cos\theta_i - \hat{z}\sin\theta_i\right)e^{-jk_1\left(x\sin\theta_i + z\cos\theta_i\right)}$$

$$\overline{E}_r = E_0\Gamma\left(\hat{x}\cos\theta_r + \hat{z}\sin\theta_r\right)e^{-jk_1\left(x\sin\theta_r - z\cos\theta_r\right)}$$

$$\overline{E}_t = E_0\mathrm{T}\left(\hat{x}\cos\theta_t - \hat{z}\sin\theta_t\right)e^{-jk_2\left(x\sin\theta_t + z\cos\theta_t\right)}$$

Ondas em dielétricos
Incidência oblíqua

lei de Snell $\quad \eta_1 \sin\theta_i = \eta_2 \sin\theta_t$



componente perpendicular ao plano de incidência

$$r_\perp = \frac{\eta_1 \cos\theta_i - \eta_2 \cos\theta_t}{\eta_1 \cos\theta_i + \eta_2 \cos\theta_t}$$

$$t_\perp = \frac{2\eta_1 \cos\theta_i}{\eta_1 \cos\theta_i + \eta_2 \cos\theta_t}$$

componente paralela ao plano de incidência

$$r_{//} = \frac{\eta_2 \cos\theta_i - \eta_1 \cos\theta_t}{\eta_2 \cos\theta_i + \eta_1 \cos\theta_t}$$

$$t_\perp = \frac{2\eta_1 \cos\theta_i}{\eta_2 \cos\theta_i + \eta_1 \cos\theta_t}$$

$r_\perp = 0$: polarização total

$$\theta_B = arctg\,\frac{\eta_2}{\eta_1}$$

com um ‘pouco’ de manipulação algébrica...

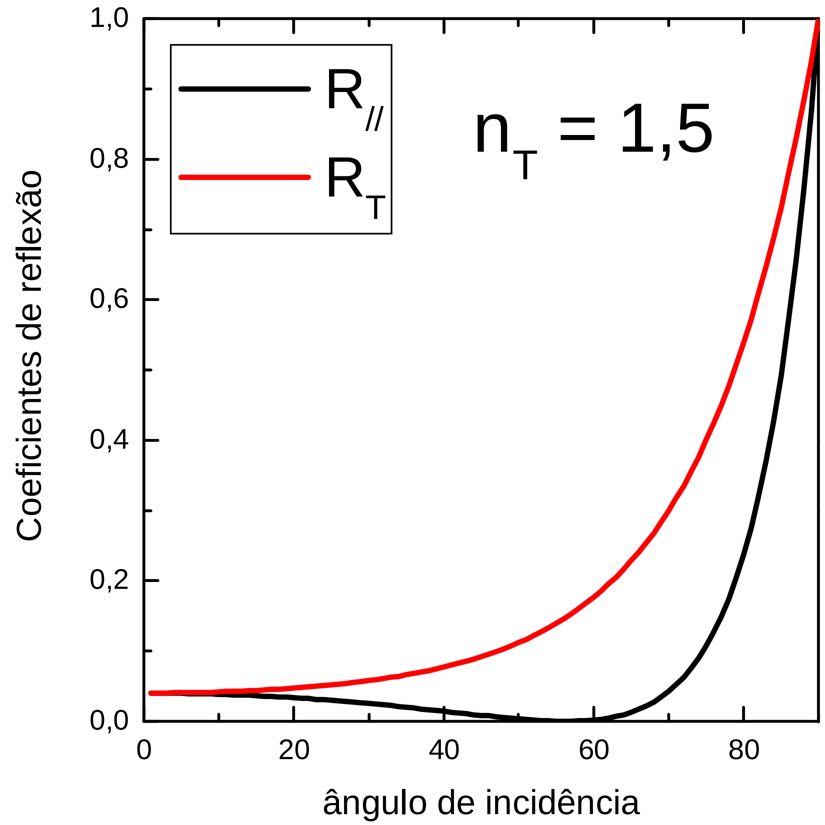
Polarização por reflexão

- Coeficientes de reflexão ($R = I/I_0$)

$$R_{//} = \frac{tg^2(\theta_i - \theta_t)}{tg^2(\theta_i + \theta_t)}$$

$$R_T = \frac{sen^2(\theta_i - \theta_t)}{sen^2(\theta_i + \theta_t)}$$

$$n_i sen(\theta_i) = n_t sen(\theta_t)$$



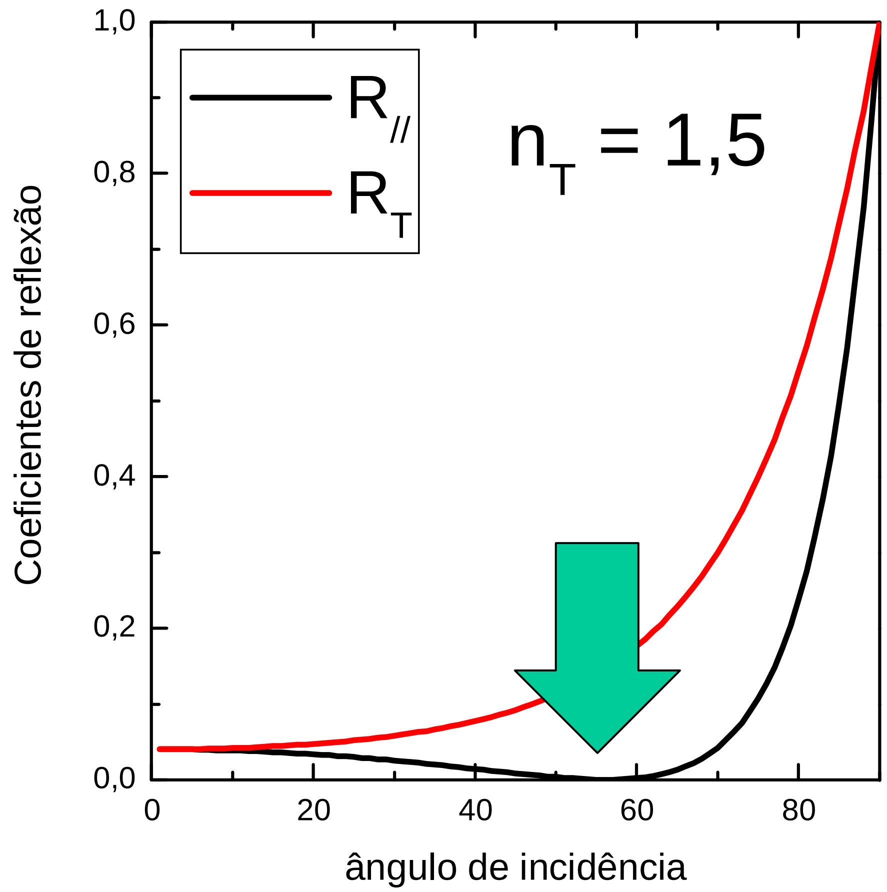
Polarização por reflexão

- Em um dado ângulo a componente // da luz refletida tem intensidade 0

- Luz totalmente polarizada na outra direção (transversal)

$$R_{//} = \frac{tg^2(\theta_i - \theta_t)}{tg^2(\theta_i + \theta_t)} = 0$$

$$\boxed{\theta_i + \theta_t = 90^o}$$



Polarização por reflexão

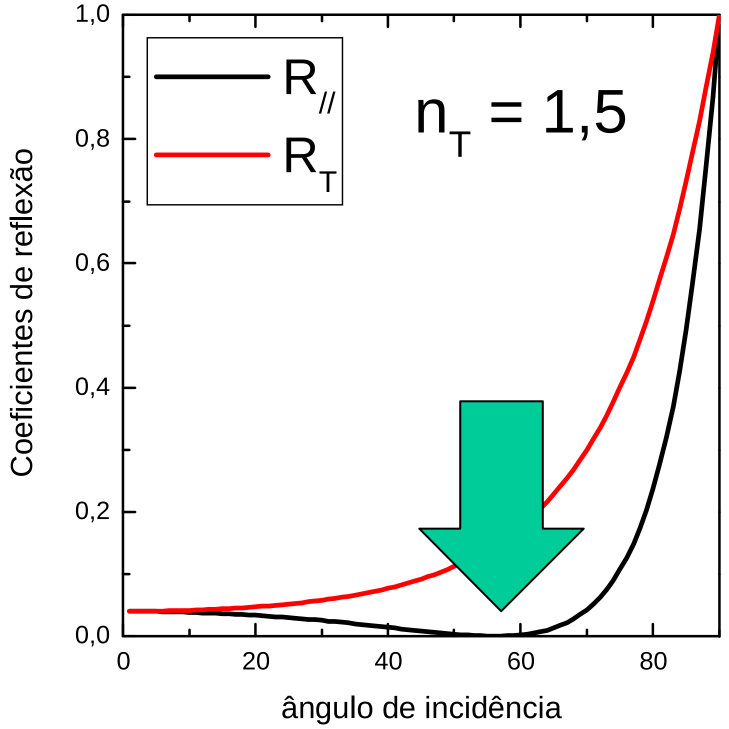
- O ângulo no qual a luz refletida é totalmente polarizada é chamado:
  - Ângulo de Brewster

$$\theta_t = 90^o - \theta_i$$

$$n_i sen\left(\theta_i\right) = n_t sen\left(90^o - \theta_i\right)$$

$$n_i sen\left(\theta_i\right) = n_t \cos\left(\theta_i\right)$$

$$\boxed{\theta_i = \theta_B = \arctan\left(\frac{n_t}{n_i}\right)}$$



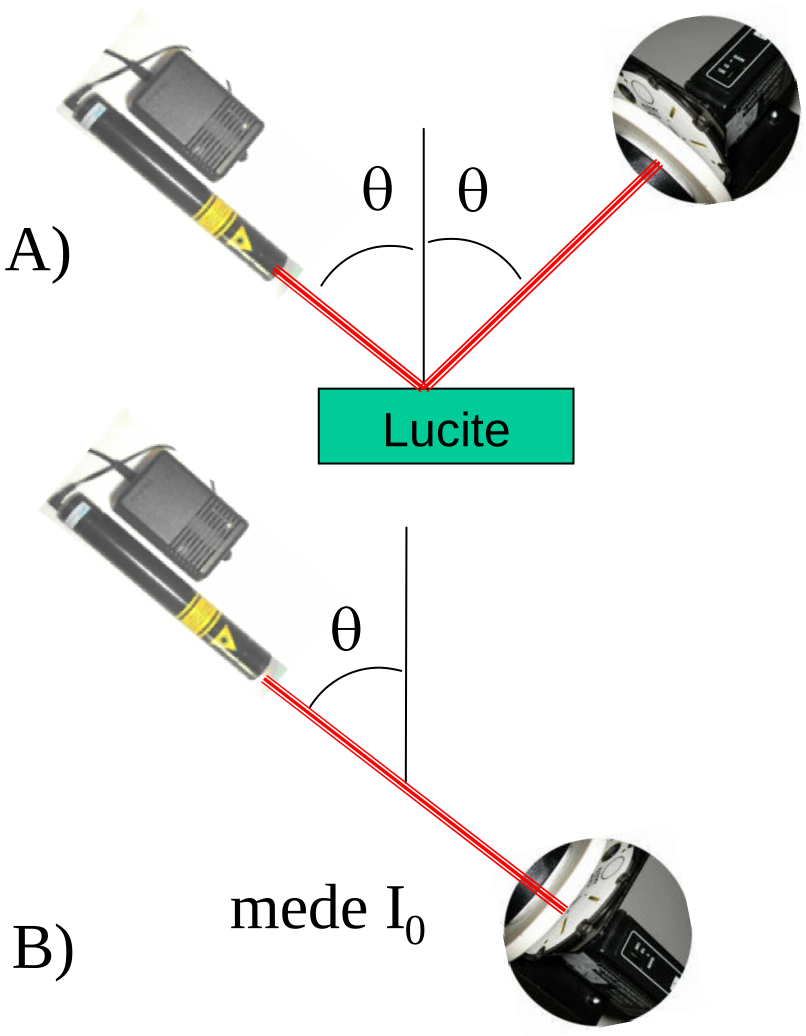
Objetivos

- Verificar experimentalmente a polarização por reflexão no acrílico
  - Medir e graficar os coeficientes de reflexão $R_{//}$ e R_T em função do ângulo de incidência
  - Determinar o ângulo de Brewster e o índice de refração do material refletor (mínimo de $R_{//}$)

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_t}{n_i}\right)$$

Polarização por reflexão

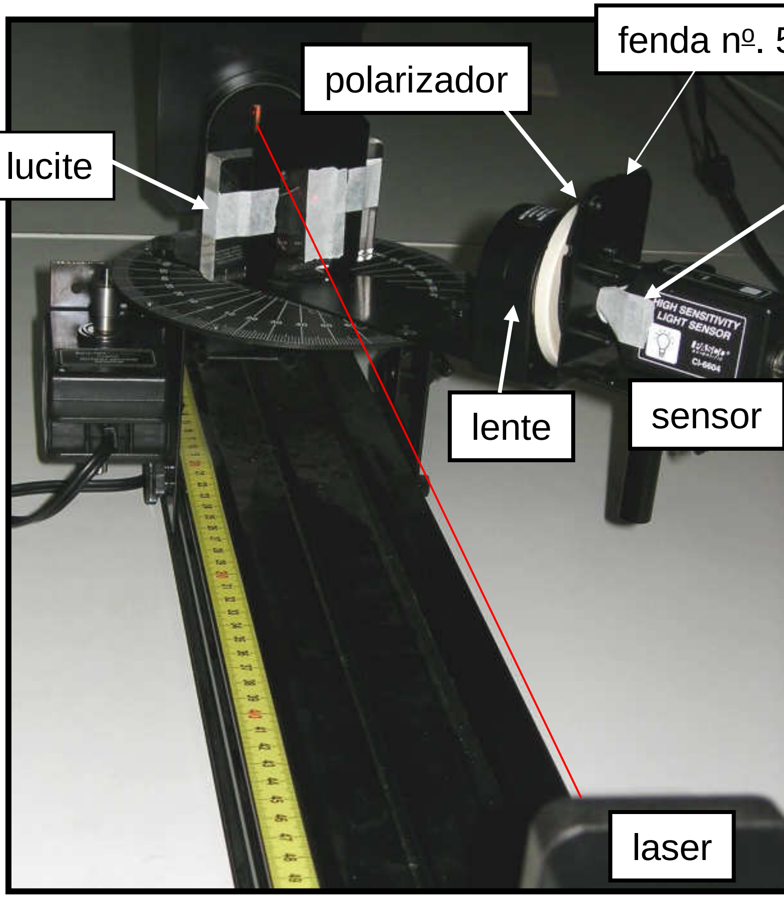
Arranjo experimental para espectrofotometria Pasco adaptado para medida de polarização por reflexão.

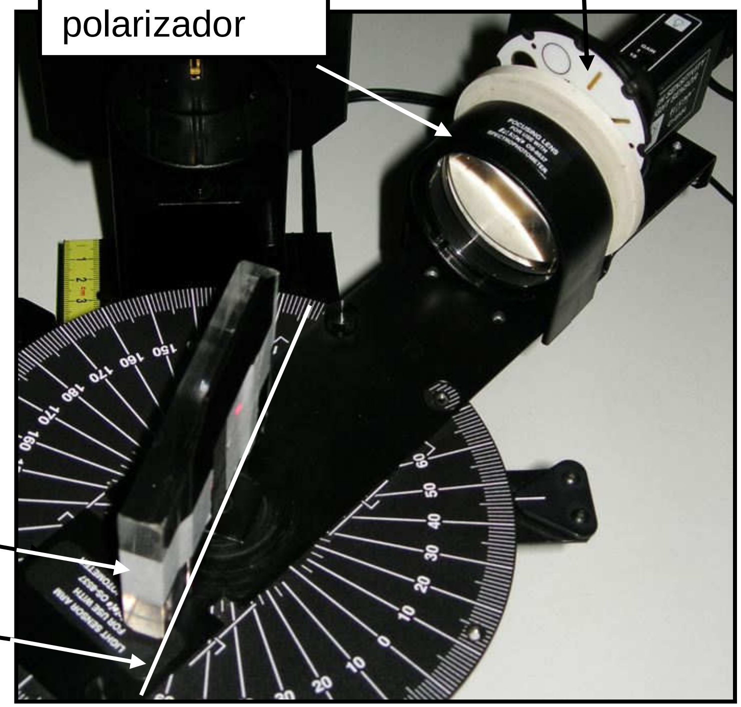


- Cuidado com o alinhamento do sistema
- Cobrir o sensor com uma fita crepe para dispersar a luz incidente (já foi feito). Usar a fenda nº. 5;
- Essa geometria é chamada "θ–2θ". Mantendo o laser fixo, posicione o sensor em 2θ e mova o bloco até θ para ver a luz refletida incidir no sensor. Reajuste a altura do laser para máximo sinal. Meça I_0 vez por outra para corrigir eventuais mudanças de intensidade do laser. Mude o ganho se necessário.
- Medir as intensidades $I_{//}$ e I_T em função do ângulo de reflexão. Medir também $I_{//}+I_T$ sem polarizador (controle redundante);

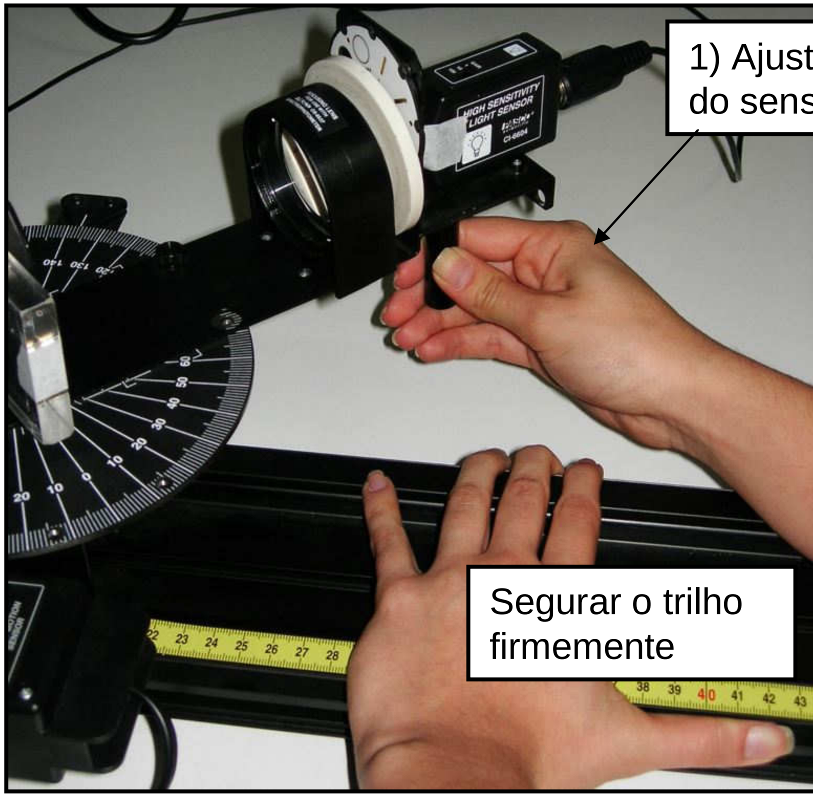
Graficar de $R_{//}$ e R_T como função do ângulo θ. Ajustar a função teórica esperada.

Vista geral do arranjo para medida do ângulo de brewster





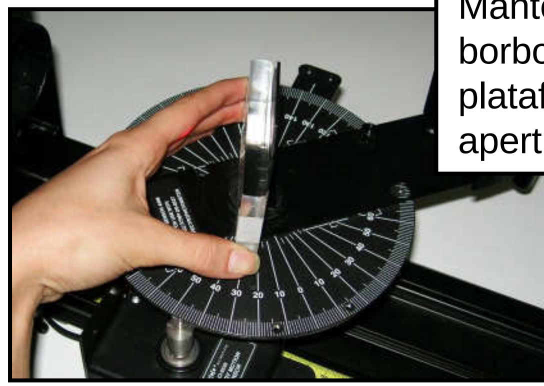
Detalhes do arranjo para medida do ângulo de brewster



1) Ajustar ângulo 2θ do sensor.

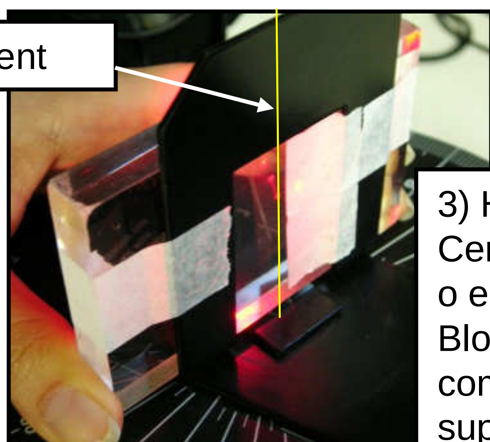
Segurar o trilho firmemente

2) Ajuste o ângulo θ do bloco até a luz laser incidir na fenda. Manter a porca borboleta sob a plataforma levemente apertada.

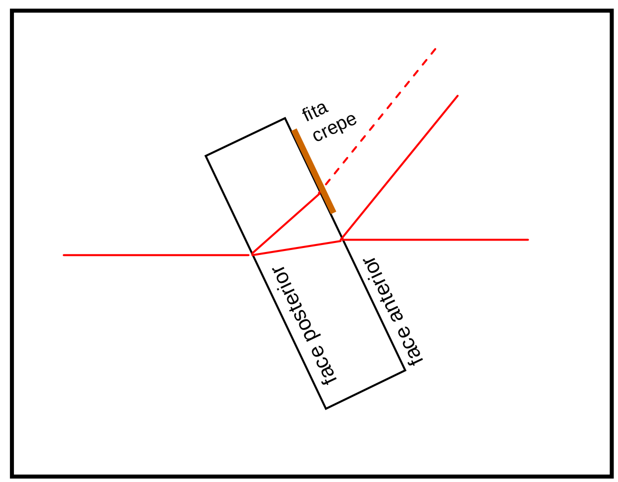


4) Regule a altura do laser para incidir no centro vertical.

eixo cent



3) Há dois raios refletidos. Centralizar o anterior com o eixo central do suporte. Bloquear o raio posterior com uma fita crepe na superfície anterior.



Detalhes do arranjo para medida do ângulo de brewster

Altura do laser ajustado no centro vertical mas ainda não no centro da fenda.

Altura do laser ajustado no centro vertical.
Ângulo do lucite ajustado com o laser no centro da fenda (máximo da leitura de sinal do sensor).

Ajustar o ganho x1, X10, x100, do sensor conforme necessário.
Ângulos traseiros = sinal fraco = ganho alto.
Ângulos dianteiros = sinal forte = ganho baixo.
Corrija o valor da medida conforme o ganho utilizado.

Ajuste os ângulos e maximize a leitura.
Ajuste o polarizador meça R_p.
Rode o polarizador em 90°, meça R//
Retire o polarizador, meça R total (medida redundante)

Cuidados especiais

- NUNCA DESLIGAR O LASER
  - O Laser é não polarizado mas leva um tempo (algumas horas) para atingir essa situação e estabilizar.

- Verificar se, de fato, o laser não é polarizado.
- Cobrir o arranjo experimental com o pano preto para evitar luzes espúrias;
- Organizar a tomada de dados de forma a alternar as medidas de I_0, $I_{//}$ e I_T para garantir a correta normalização $I_{//}/I_0$ e I_T/I_0.
- A medida de $I_{//}+I_T$ é para controle redundante.